

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-131715

(43)Date of publication of application : 09.05.2002

(51)Int.Cl.

G02F 1/03  
G02B 6/12  
G02F 1/313

(21)Application number : 2000-319375

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 19.10.2000

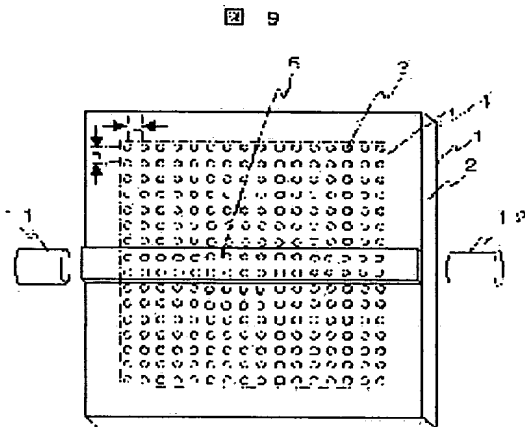
(72)Inventor : HAMADA TOMOYUKI  
KATSUYAMA TOSHIO

## (54) OPTICAL DEVICE AND SUBSTRATE

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide an optical device having a photonic crystal structure in which an optical integrated circuit can be easily formed.

**SOLUTION:** The device is equipped with a first electrode, an electro-optic substrate made of a solid material formed on one surface of the first electrode, a photonic crystal region made of a solid material formed in the electro-optical substrate, a second electrode patterned on the surface of the photonic crystal region opposing to the first electrode, a means to apply a voltage between the first electrode and second electrode, a means to allow light to enter the photonic crystal region under the second electrode, and a means to receive the light guided by the photonic crystal region under the second electrode.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 08.10.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3586635

[Date of registration] 13.08.2004

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-131715

(P2002-131715A)

(43) 公開日 平成14年5月9日 (2002.5.9)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード* (参考)
G 0 2 F 1/03	5 0 5	G 0 2 F 1/03	5 0 5 2 H 0 4 7
G 0 2 B 6/12		1/313	2 H 0 7 9
G 0 2 F 1/313		G 0 2 B 6/12	N 2 K 0 0 2
			Z

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2000-319375(P2000-319375)

(22) 出願日 平成12年10月19日 (2000. 10. 19)

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 浜田 智之

埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会  
社日立製作所基礎研究所内

(72) 発明者 勝山 俊夫

埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会  
社日立製作所基礎研究所内

(74) 代理人 100068504

弁理士 小川 勝男 (外2名)

最終頁に続く

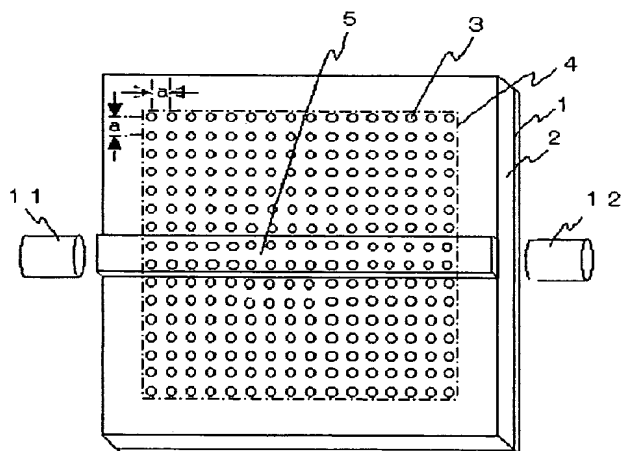
(54) 【発明の名称】 光デバイスおよび基板

(57) 【要約】

【課題】 光集積回路を容易に形成できるフォトニック結晶構造の光デバイスを提供する。

【解決手段】 第1の電極と、前記第1の電極の一面に形成された固体材料よりなる電気光学基板と、前記電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶領域と、前記フォトニック結晶領域の前記第1の電極と対向する面にパターン形成された第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極の間に電圧を印加する手段と、前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に光を入射する手段および前記第2の電極下のフォトニック結晶領域で導波された光を受光する手段とを備える。

図 9



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】第1の電極と、前記第1の電極の一面に形成された固体材料よりなる電気光学基板と、前記電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶領域と、前記フォトニック結晶領域の前記第1の電極と対向する面に前記電気光学基板中を導波する光の波長の $1/2$ 以上の幅をもつようにパターン形成された第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極の間に電圧を印加する手段と、前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に光を入射する照射器および前記第2の電極下のフォトニック結晶領域で導波された光を受光する受光器とを備えたことを特徴とする光デバイス。

【請求項2】前記第2の電極が二つ以上に分離され、かつ、分離された電極が前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に入射される光の波長の $1/2$ 程度に近接して配置されるとともに、それぞれの電極に加える電圧が独立に制御される請求項1記載の光デバイス。

【請求項3】前記分離された二つの第2の電極の間に第3の独立した電極を前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に入射される光の波長の $1/2$ 程度に近接して配置するとともに、前記第2の電極に加える電圧と前記第3の独立した電極に加える電圧とが独立に制御される請求項2記載の光デバイス。

【請求項4】前記電気光学基板上面に絶縁材料の層が形成されるとともに、前記第2または第3の電極が前記絶縁材料の層に形成されたスルーホールを介して導出された導体を利用して電圧が印加される請求項1ないし3のいずれかに記載の光デバイス。

【請求項5】固体材料よりなる電気光学基板と、前記電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶領域と、前記フォトニック結晶領域の両面に同一のパターンで形成された第1の電極および第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極の間に電圧を印加する手段と、前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に光を入射する照射器および前記第2の電極下のフォトニック結晶領域で導波された光を受光する受光器とを備えたことを特徴とする光デバイス。

【請求項6】前記電極のパターンに対応するフォトニック結晶領域が、直線型、L字型、S字型、およびT字型光導波路、電気光学スイッチ、波長選択回路、交差型光スイッチ、光交換器あるいは光導波路および電気光学スイッチからなる光集積回路として機能する請求項1ないし5のいずれかに記載の光デバイス。

【請求項7】第1の電極と、前記第1の電極の一面に形成された固体材料よりなる電気光学基板と、前記電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶領域と、前記フォトニック結晶領域の前記第1の電極と対向する面に前記電気光学基板中を導波する光の波長の $1/2$ 以上の幅をもつようにパターン形成された第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極の間に電圧

を印加する手段とよりなることを特徴とする光デバイス用基板。

【請求項8】前記第2の電極が二つ以上に分離され、かつ、分離された電極が前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に入射される光の波長の $1/2$ 程度に近接して配置されるとともに、それぞれの電極に加える電圧が独立に制御される請求項7記載の光デバイス用基板。

【請求項9】前記分離された二つの第2の電極の間に第3の独立した電極を前記第2の電極下のフォトニック結晶領域に入射される光の波長の $1/2$ 程度に近接して配置するとともに、前記第2の電極に加える電圧と前記第3の独立した電極に加える電圧とが独立に制御される請求項8記載の光デバイス用基板。

【請求項10】前記電気光学基板上面に絶縁材料の層が形成されるとともに、前記第2または第3の電極が前記絶縁材料の層に形成されたスルーホールを介して導出された導体を利用して電圧が印加される請求項7ないし9のいずれかに記載の光デバイス用基板。

【請求項11】固体材料よりなる電気光学基板と、前記電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶領域と、前記フォトニック結晶領域の両面に同一のパターンで形成された第1の電極および第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極の間に電圧を印加する手段とよりなることを特徴とする光デバイス用基板。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信システム、光情報システムに用いられる光素子および光集積回路に関する

## 【0002】

【従来の技術】近年、光の波動状態を波長オーダで制御できる人工結晶としてフォトニック結晶が注目を集めており、その研究が数多くなされている。

【0003】フォトニック結晶とは、光に対して透明な媒質中に、媒質中光波長の2分の1程度の周期の屈折率変化を形成して得られる材料である。

【0004】フォトニック結晶中での光波の挙動は、半導体結晶中での電子波の挙動のアナロジーとして理解できることが良く知られている。半導体結晶中での電子波が、周期的な結晶構造によりブラッグ反射されて電子バンド構造ができるのと同様に、フォトニック結晶中の光波は、媒質中の周期的な屈折率変化に散乱されてフォトニックバンドを形成する。フォトニック結晶は、光に対する禁制帯であるフォトニックバンドギャップ、光に対する高い分散性等、ユニークな光学的性質を有するため、超小型光集積回路への応用が期待されている。

【0005】2次元フォトニック結晶の作成法としては、スラブ光導波路に2次元周期的に空孔を開ける方法が知られている。この方法は、導波路と空孔がそれぞれ

異なる屈折率を有することを利用する方法である。特開平11-330619号公報は、この方法により光共振器として作用する2次元フォトニック結晶を作成し、超小型極低しきい値レーザを実現する方法を開示している。同公報の提案は、フォトニックバンド中の波長の光がフォトニック結晶により強く反射されることを利用したものである。また、応用物理学会誌第68巻1335頁～1345頁には、上記方法により作成される2次元フォトニック結晶を利用したL字型急峻曲がり導波路が紹介されている。この導波路は、フォトニックバンド中の波長の光がフォトニック結晶により強く反射されることを利用して、フォトニック結晶をクラッドとして使い、従来は不可能であった急峻曲がり導波路を実現しようとするものである。特開平11-330619号公報は、上記方法により2次元フォトニック結晶を作成し、超小型波長分波回路を実現する方法を提案している。これは、フォトニック結晶が、従来の光学結晶よりもはるかに高い光分散性を示すことを利用した提案である。

【0006】3次元フォトニック結晶の作成法としては、(a)半導体多層膜に2次元周期的に空孔を開ける方法、(b)半導体多層膜の特定層を2次元周期的に酸化する方法、(c)半導体多層膜の層構造を3次元周期的に変動させる方法が知られている。(a)の方法は、特開平11-316154号公報に開示されている。この方法は、屈折率が異なる2種類の半導体を交互積層して半導体多層膜を作成し、多層膜に2次元周期的に空孔を開けることにより3次元周期的な屈折率変化を形成してフォトニック結晶を作る方法である。特開平11-186657号公報には、この方法により3次元フォトニック結晶を作成し、作成した結晶を光共振器とする超小型極低しきい値レーザを実現する方法が開示されている。(b)の方法は、特開2000-31587号公報に開示されている。この方法は、半導体多層膜を構成する特定層を2次元周期的に酸化して、フォトニック結晶を作成する方法である。(c)の方法は、応用物理学会誌第68巻1335-1345ページに説明されている。この方法は、2次元周期的な凹凸を有する基板上に、屈折率の異なる2種類の半導体を交互積層し、基板の凹凸を層構造に反映させて3次元周期的な凹凸を有する層構造を形成して、3次元フォトニック結晶を得る方法である。

【0007】そのほか、特開平10-83005号公報には、表面に金属膜が形成された回折格子を対向させ、回折格子の間に光機能性有機材料を挟みこむことによりフォトニック結晶を作成する方法が提案されている。

【0008】さらに、米国特許6,064,506号には、電圧印加により屈折率が変化する非線形光学材料を用いて電圧印加時にフォトニックバンドが変化するフォトニック結晶を構成する方法が示されている。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、従来の技術では、光集積回路をフォトニック結晶により形成することが困難であった。光集積回路は、複雑な形状の光導波路からなるが、前記の従来方法では、複雑な形状のフォトニック結晶導波路を容易に作成できないからである。

【0010】たとえば、スラブ型導波路あるいは半導体多層膜に2次元周期的に空孔を開けてL字型光導波路を作成する場合、L字型の導波路コアを除く材料部分に、波長の2分の1程度の周期で2次元周期的に空孔を開ける必要があるが、このように空孔を機械的に開けるのは困難である。従って、この方法では、より複雑な形状の導波路を有する光集積回路を作成することは難しい。

【0011】また、半導体多層膜の特定層を2次元周期的に酸化してフォトニック結晶を作成する特開平2000-31587号公報の方法は、フォトニック結晶の母体となる材料が限定されるという欠点がある。

【0012】一方、表面に金属膜を形成した回折格子の間に光機能性有機材料を挟みこむ特開平10-83005号公報の方法は、有機膜厚を一定の値に保つことが困難であるという問題点を有し、均一なフォトニック結晶を作成するのに適さない。

【0013】また、上述の米国特許6,064,506号で開示された方法は、高い屈折率を有する材料より、リソグラフィ技術を用いて、柱状構造が光波長の半分程度の間隔で2次元あるいは3次元に配列した構造を作り、構造の間に形成された空間を非線形光学材料あるいは液晶材料で満たすものとなっている。このようなきわめて狭い空間を液体で満たす場合には必然的に空孔が発生するので、光学的に均一なフォトニック結晶を得ることはきわめて困難である。

【0014】このように、従来法では、フォトニック結晶を用いて超小型光集積回路を作るのは困難であった。

【0015】本発明の目的は、容易に光集積回路を形成できる固体材料によるフォトニック結晶構造の光デバイスを提供することにある。

【0016】本発明の目的は、フォトニックバンド構造およびフォトニックバンドギャップが変化できることを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスを提供することにある。

【0017】本発明の他の目的は、光導波路として作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0018】本発明の他の目的は、電気光学スイッチとして作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0019】本発明の他の目的は、直線型、L字型、S字型、およびT字型光導波路として作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0020】本発明の他の目的は、光導波路および電気光学スイッチからなる光集積回路として作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0021】本発明の他の目的は、波長選択回路として作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0022】本発明の他の目的は、交差型光スイッチとして作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0023】本発明の他の目的は、光交換器として作用することを特徴とするフォトニック結晶構造の光デバイスの提供にある。

【0024】

【課題を解決するための手段】本発明は、固体材料よりなる電気光学基板中に形成された固体材料よりなるフォトニック結晶の両面に電極を配置して、これに電圧を印加することにより、電極で挟まれた領域のフォトニック結晶領域の基板の屈折率を変化させることにより光デバイスを実現するものである。

【0025】

【発明の実施の形態】従来技術は、フォトニック結晶の形状を機械的あるいは化学的に変えて、必要とされるフォトニックバンドを有するフォトニック結晶を作成していた。このため、従来技術により複雑な形状の光導波路からなる光集積回路を作成する場合、工程が複雑となるという問題点があった。

【0026】ところで、フォトニックバンド構造は、フォトニック結晶の母体となる材料の屈折率によっても変化する。これは、材料の屈折率が材料中を進行する光の波長に影響することから容易に理解できる。

【0027】そこで、本発明では、フォトニック結晶の両面に電極を配置して電圧を加えることにより、フォトニック結晶領域の基板の屈折率が、電気光学効果により変化させるようにするものであるから、一方の電極を共通電極としてフォトニック結晶を形成する基板の一つの面の全面に設け、他の電極をフォトニック結晶を形成する基板の他の面上に光デバイスに対応するパターンとして形成することにより、任意の光デバイスデバイスを容易に得ることができる。以下、全面に設けた電極を第1の電極、光デバイスに対応するパターンとして形成された電極を第2の電極ということにする。

【0028】本発明では、第1の電極と第2の電極の間に電圧を印加することにより、第2の電極が設置してある2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造を電気光学効果により変化させることができる。

【0029】第2の電極は、半導体素子作成に用いられるフォトリソグラフィ技術を用いて任意の形状にパターン形成できる。したがって本発明では、第2の電極形状を適宜設定することにより、光集積回路に必要なフォ

トニックバンド及び形状を有するフォトニック結晶を、電気光学効果により形成できる。

【0030】例えば、本発明により、光導波路として作用することを特徴とする光デバイスを作成することができる。このデバイスは、第1の電極と第2の電極の間に電圧を印加した場合に、第2の電極が設置してある2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンドギャップが変化することを利用したものであり、電圧印加時に導波光が第2の電極が設置してある部分のみを透過するようにフォトニックバンドギャップを変化させることにより実現される。

【0031】この場合の光導波路形状は、第2の電極形状となるので、本発明によれば任意形状の光導波路を形成することができる。例えば、第2の電極形状を、直線形、L字形、S字形、およびT形とした場合には、それぞれ直線形、L字形、S字形、およびT字形の導波路が形成される。なお、本発明による光導波路では、フォトニック結晶導波路に特有な急峻曲がり導波が可能であり、導波光の進路を90度曲げることができる。

【0032】本発明では、第2の電極の設置してある2次元フォトニック結晶中に光が進行できるように、第2の電極の幅を、電気光学基板2中を導波する光の波長の $1/2$ 以上としてある。

【0033】本発明によれば、電気光学スイッチとして作用する光デバイスを作成できる。本発明による上記導波路デバイスは、第1の電極と第2の電極の間に電圧を印加した場合にのみ形成されるので、印加電圧を0とした場合には、導波路は消滅する。このように本発明の光導波路は、フォトニック結晶に電圧を印加した場合にのみ光を透過する電気光学スイッチとして作用する。

【0034】さらに、本発明によれば、光導波路および電気光学スイッチからなる光集積回路として作用することを特徴とする光デバイスを作成できる。この光デバイスは、電極上の単一の2次元フォトニック結晶表面上に複数の独立した第2の電極を連続的に設置し、第1と第2の電極の間に電圧を印加した場合に形成される光導波路の1部分が電気光学スイッチとして作用するようにすることにより実現される。

【0035】また、本発明によれば、波長分波光回路として作用することを特徴とする光デバイスを提供できる。この光デバイスは、第1の電極上の単一の2次元フォトニック結晶表面上に複数の独立した第2の電極を連続的に設置し、電極とそれぞれのパターン電極の間に印加する電圧が異なるようにすることにより実現される。

【0036】さらに、本発明によれば、交差型光スイッチとして作用することを特徴とする光デバイスを提供できる。このデバイスは、上記光導波路形成法により交差型光回路を形成し、交差部分のフォトニックバンドギャップを変化できるようにすることにより実現される。

【0037】この交差型光スイッチを複数組み合わせた

光回路を単一の２次元フォトニック結晶中に形成することにより、光交換器が実現される。

【００３８】本発明を構成する電気光学効果を示す基板としては何をを用いてもよいが、安定性の観点から無機材料を用いることが好ましく、例えば、従来より、光回路基板として用いられているニオブ酸リチウム（ $\text{LiNbO}_3$ ）を基板として用いることができる。

【００３９】このように本発明によれば、単一の２次元フォトニック結晶より、フォトニック結晶構造の光集積回路を電氣的に形成的に作成でき、複雑な工程を要する従来技術と比較してすぐれている。

【００４０】以下、図面を参照して本発明の実施例を詳細に説明する。図中、同一の機能を有するものには同一の符号をつけてある。なお、以下の実施例では、空孔が正格子状に配置されている２次元フォトニック結晶を用いた例を示すが、本発明は２次元フォトニック結晶の空孔格子形状に制限されない。

（第１の実施例）図１は、本発明の最も単純な実施例１を上側からの斜視図の形で示す模式図、図２は、図１のＡＡ位置で矢印方向に見た面断面図である。図２では、さらに、第１の電極と第２の電極の間に電圧を印加するための構成も示した。図中、１は第１の電極、２は電極１上の電気光学基板、３は空孔、４は基板２中に形成された２次元フォトニック結晶領域、５は第２の電極、６はフォトニック結晶領域４の内、電極１、５間に電圧が印加されることにより屈折率が変化する修飾された２次元フォトニック結晶領域、７は電極１、５間に電圧を印加するための直流電源、８は開閉スイッチである。この実施例１では、図２に示すように、空孔３は、電極１、電極５及び電気光学基板２を貫通するように形成されているが、これは、電極１、電気光学基板２及び電極５を所定の形に形成した上で、空孔３を形成する方が製作しやすいからこうしたのであって、電極１及び電極５に空孔３を形成することは必然ではない。

【００４１】空孔３の配列周期は、縦横ともに $a$ である。 $a$ の値は、電気光学基板２中を導波する光の波長の $1/2$ 程度である。例えば、電気光学基板２を光ファイバー通信で用いられる波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯用のフォトニック結晶とする場合には、 $a$ の値は $0.5\mu\text{m}$ 程度である。

【００４２】本実施例１では、電極１、５間に電源７により電圧を印加した場合に、２次元フォトニック結晶領域４の内、電場が印加された部分は修飾された２次元フォトニック結晶領域６となり、この領域は電気光学効果により屈折率が変化する。

【００４３】電気光学による屈折率変化 $\delta n$ は（１）式で与えられる。

$$\delta n = z E \quad (1)$$

ここで、 $z$ は電気光学定数、 $E$ は電場強度である。 $z$ は、正または負の値であるが、多くの電気光学材料では

$z$ の値が正であることが知られている。本実施例では、 $z$ が正である電気光学材料を電気光学基板２に用い、電極１、５間に電圧を印加した場合に修飾された２次元フォトニック結晶領域６の屈折率がフォトニック結晶領域４の部分の屈折率よりも大きくなるようにした。

【００４４】図３（ａ）は、２次元フォトニック結晶領域４のフォトニックバンド構造の模式図である。光に対する禁制帯であるフォトニックバンドギャップの位置を太線でしめす。修飾された２次元フォトニック結晶領域６はフォトニック結晶領域４の１部分であるので、電極１、５間に電圧を印加しない場合、すなわち、修飾されていない場合には、この領域のフォトニックバンド構造も図３（ａ）である。

【００４５】電極１、５間に電圧を印加すると、修飾された２次元フォトニック結晶領域６の部分の屈折率が電気光学効果により増加する。一般に屈折率が $m$ 倍になった場合、電極５の存在する領域のフォトニック結晶領域４内部を導波する光の波長は $1/m$ となり、その波数 $k$ は $m$ 倍となる。一方、光のエネルギーは屈折率変化の前後で変化しないので、電極１、５間に電圧を印加した場合のフォトニックバンドは、縦軸のスケールを $1/m$ 倍した構造となる。本実施例では、電極１、５間に電圧 $V$ を印加した場合、修飾された２次元フォトニック結晶領域６の屈折率が $1.18$ 倍となるようにした。電極１、５間に電圧 $V$ を印加した場合の修飾された２次元フォトニック結晶領域６のフォトニックバンド構造を図３（ｂ）に示す。

【００４６】このように、本実施例１では、電極１、５間に電圧を印加することにより、修飾された２次元フォトニック結晶領域６のフォトニックバンド構造を変化させることができる。

【００４７】図３（ｂ）のフォトニックバンドギャップは、図３（ａ）のそれと比較して、バンドギャップ上端および下端のエネルギーが大きく、バンドギャップ幅が広い。このように、本実施例では、電極１、５間に電圧を印加することにより、６のフォトニックバンドギャップを変化させることができる。

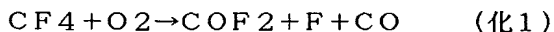
【００４８】このように、本実施例では、第１の電極と第２の電極の間に電圧を印加することにより、パターン電極が設置してあるフォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造およびフォトニックバンドギャップを変化させることができる。なお、電気光学効果による屈折率変化 $\delta n$ は印加電場に比例して増大する（（１）式）ので、本実施例では、電極１、５間の印加電圧を変えることにより、６のフォトニックバンド構造およびフォトニックバンドギャップを連続的に変化させることが可能である。図４に、電極１、５間に印加する電圧を $0$ 、 $1$ 、 $0\text{V}$ 、 $1.2\text{V}$ 、 $1.3\text{V}$ 、 $1.5\text{V}$ と変えた場合の修飾された２次元フォトニック結晶領域６のフォトニックバンドギャップの位置の変化を示す。印加する電圧を高

くすることにより、バンドギャップの上端および下端のエネルギーが上昇し、バンドギャップの幅がひろくなる。

【0049】図5、6、及び7に、本実施例1の光デバイスの作成手順を断面図で示す。最初に電気光学基板2の両面に電極1、電極5を形成する。電気光学基板2としては、例えば、ニオブ酸リチウム $\text{LiNbO}_3$ を用い、電極1、電極5は、アルミニウム等の金属を電気光学基板2表面に蒸着して形成する。続いて、半導体素子作成に用いられている光リソグラフィ技術により、電極5をパターン形成する(図6)。なお、現在の光リソグラフィ技術によれば、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の線幅のパターン電極を形成できる。最後に、電子ビームリソグラフィと反応性イオンビームエッチングを用いて、空孔3を電極5、電気光学基板2、電極1を貫通するように周期的に形成することにより、本実施例1の光デバイスが得られる(図7)。

【0050】電極1及び5がアルミニウムであり、電気光学基板2がニオブ酸リチウムである場合、空孔3は、半導体素子作成に用いられる光フォトリソグラフィ技術及びプラズマエッチング技術を用い、空孔部分を選択的にエッチングして形成できる。 $\text{CH}_4$ 及び $\text{O}_2$ を用いるプラズマエッチングでは下記(化1)に示す化学反応が進行し活性種Fが生じる。

【0051】



この反応条件下では、アルミニウムは酸化されては酸化アルミニウムとなり、活性種Fによりエッチング可能となる。またニオブ酸リチウムは、活性種Fによりエッチング可能である。したがって、上記プラズマエッチングによれば電極1及び5、ならびに電気光学基板2をエッチングして空孔3を形成できる。

【0052】図8(a)、(b)に、電極1、5間に電圧を印加する方法の例を示す。(a)において、7は電圧源としての電気回路、8は金属基板、9は電圧源7の電極、10は電極5と電極9を接続する金属ワイヤーである。電極1は電圧源7の他の電極に接続された金属基板8と接触するとともに電気的に接続されて配置されている。電圧源7は金属基板8と電極9の間に所定の直流電圧を発生させ、金属基板8と金属ワイヤー10とにより電極1、5間に電圧を印加できる。このように、本実施例を電気回路と組み合わせて構成することにより、電極1、5間に電圧が印加するようにできる。

【0053】(b)は、電気光学基板2の上面に、たとえば、 $\text{SiO}_2$ による絶縁層100を形成して、その上に、金属ワイヤー10に代わる配線層10'を形成し、この配線層10'を絶縁層100に形成したスルーホールを介して電極5と接続するとともに、金属ワイヤー101によって電極9と接続したものである。このように電気光学基板2の上面に配線層10'を形成する場合、

電気光学基板2の厚さの3倍程度の絶縁層を設ければ、この配線層10'が2次元フォトニック結晶領域4に影響を及ぼすことはない。

(第2の実施例)図9は直線型光導波路として作用する本発明の光デバイスの実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトニック結晶領域、5は第2の電極である。本実施例では、直線状の電極5を用いた。電極5の幅は空孔3の配列周期aの2倍よりやや大きくした。すなわち、本実施例で構成される導波路に導入される光の波長よりやや長いものとした。以下の実施例でも同様とする。電極1、5間の電圧印加により2次元フォトニック結晶領域4の内、電極5で覆われた領域は修飾された2次元フォトニック結晶領域となる。電極1、5間に電圧を印加することにより、修飾された2次元フォトニック結晶領域の屈折率が電気光学効果により増大するようにした。11と12は光ファイバーであり、それぞれが電気光学基板2の端面で、電極5で覆われた領域の部分と光学的に接続されるようにした。

【0054】電極1、電気光学基板2、空孔3及び空孔3の配列周期aは第1の実施例の場合と同じである。本実施例は、電極5および6の形状は直線状である点が、第1の実施例と異なる。従って、2次元フォトニック結晶領域4のフォトニックバンド構造は図3(a)である。電極1、5間への電圧印加による修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造は、電極1、5間の印加電圧により変化し、印加電圧が0である場合のフォトニックバンド構造は図3(a)、印加電圧がVを印加した場合のフォトニックバンド構造は図3(b)である。

【0055】電極1、5間に電圧を印加せずに、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を電極5で覆われた領域の電気光学基板2の端面に入射すると、入射光はフォトニックバンドギャップ中の光であるので(図3(a)参照)2次元フォトニック結晶領域4を透過できず、光ファイバー12へ光は出力されない。一方、電極1、5間に電圧Vを印加した場合、修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造は図3(b)となるので、入射光は修飾された2次元フォトニック結晶領域を透過できるようになる。修飾された2次元フォトニック結晶領域を除く2次元フォトニック結晶領域4の部分のフォトニックバンド構造は印加電圧に関係なく図3(a)である。このため、入射光は修飾された2次元フォトニック結晶領域を除く2次元フォトニック結晶領域4に進行できず、修飾された2次元フォトニック結晶領域内部を導波して光ファイバー12へと出力される。このように、本実施例は、電極1、5間に電圧Vを印加した場合、直線型光導波路として作用する。

【0056】これに対して、電極1、5間に電圧を印加

しない場合、本実施例は導波路として作用しない。従って、本実施例は、電極1、5間の電圧により6の光の透過状態をコントロールすることができる。即ち、電極1、5間に電圧を印加しない場合、光ファイバー11と光ファイバー12は光学的に接続されないが、電極1、5間に電圧Vを印加した場合には、光ファイバー11と光ファイバー12は修飾された2次元フォトニック結晶領域により光学的に接続される。このように、本実施例は、電極1、5間の電圧を変化させることにより、電気光学スイッチとして作用する。

【0057】なお、本実施例でも、図8(a)、(b)で説明したと同様の配線が設けられるが、図が煩雑となるだけなので、表記を省略した。以下の実施例についても配線の表記は省略する。

(第3の実施例) 図10はL字型光導波路として作用する本発明の実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトニック結晶領域、5は第2の電極である。本実施例3では、電極5をL字型とした点において実施例2と異なるのみで、他は同じである。本実施例でも、電極1、5に電圧が印加されると、2次元フォトニック結晶領域4の内、電極5に覆われた部分は修飾された2次元フォトニック結晶領域となり、第2の実施例と同様に、光ファイバー11から入射された光は光ファイバー12に出力される。このように、本実施例はL字型急峻導波路として作用し、フォトニック結晶構造の光導波路に特徴的な急峻曲がり導波が可能である。

【0058】電極1、5間に電圧を印加しない場合には、第2の実施例同様、本実施例3は光導波路として作用しない。従って本実施例3は、電極1、5間の電圧を変化させることにより、光ファイバー11と光ファイバー12の間の光学的接続状態を変えることができ、電気光学スイッチとして作用する。

(第4の実施例) 図11はS字型光導波路として作用する本発明の実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトニック結晶領域、5は第2の電極である。本実施例4では、電極5をS字型とした点において実施例2、3と異なるのみで、他は同じである。

【0059】本実施例4においても、S字型電極5で覆われた領域は、電極1、5間に電圧を印加されると、修飾された2次元フォトニック結晶領域となる。2次元フォトニック結晶領域4のフォトニックバンド構造および電圧印加による修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造は、第1の実施例の場合と同じである(図3、4参照)。

【0060】第2、3の実施例同様、本実施例は光導波路として作用する。即ち、電極1、5間に電圧Vを印加して、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を

入射させると、入射光は修飾された2次元フォトニック結晶領域を導波して光ファイバー12へと出力される。このように、本実施例は、フォトニック結晶構造の光導波路に特徴的な急峻曲がり導波を利用するS字型急峻導波路として作用する。

【0061】一方、電極1、5間に電圧を印加しない場合には、第2、3の実施例同様、本実施例は導波路として作用しない。従って本実施例4は、電極1、5間の電圧を変化させることにより、光ファイバー11と光ファイバー12の間の光学的接続状態を変えることができ、電気光学スイッチとして作用する。

(第5の実施例) 図12はT字型光導波路として作用する本発明の実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトニック結晶領域、5は第2の電極である。本実施例5では、電極5をT字型とした点において実施例2-4と異なるのみで、他は同じである。

【0062】本実施例5においても、T字型電極5で覆われた領域は、電極1、5間に電圧を印加されると、修飾された2次元フォトニック結晶領域となる。2次元フォトニック結晶領域4のフォトニックバンド構造および電圧印加による修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造は、第1の実施例の場合と同じである(図3、4参照)。

【0063】第2-4の実施例同様、本実施例は光導波路として作用する。即ち、電極1、5間に電圧Vを印加して、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を入射させると、入射光は修飾された2次元フォトニック結晶領域を導波し、T字交差部で分岐されて光ファイバー12、13へと出力される。このように、本実施例は、フォトニック結晶構造の光導波路に特徴的な急峻曲がり導波を利用するT字型急峻導波路として作用する。

【0064】一方、電極1、5間に電圧を印加しない場合には、第2-4の実施例同様、本実施例は導波路として作用しない。従って本実施例5は、電極1、5間の電圧を変化させることにより、光ファイバー11と光ファイバー12、13の間の光学的接続状態を変えることができ、電気光学スイッチとして作用する。

【0065】上述した第2-5の実施例で示したように、本発明は、2次元フォトニック結晶4中に第2の電極形状に対応した光導波路を形成でき、形成された導波路は電気光学スイッチとして動作可能である。本発明によれば、第2の電極形状を適宜変えることにより、任意形状のフォトニック結晶導波路及び電気光学スイッチを作成でき、複雑な光集積回路を作ることができる。

(第6の実施例) 図13は、光導波路および電気光学スイッチからなる光集積回路として作用する本発明の実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2



次元フォトリック結晶領域、5および14は第2の電極である。本実施例6では、第2の電極を電極5と電極14に分割し、両者を間隔 $d$ だけ離して配置した点において実施例2-5と異なるのみで、他は同じである。従って、電極1、5間および電極1、14間に電圧を印加した場合に、2次元フォトリック結晶領域4の電極5、14に対応する領域が修飾された2次元フォトリック結晶領域6となること、また、2次元フォトリック結晶領域4および修飾された2次元フォトリック結晶領域のフォトリックバンド構造は、第1の実施例の場合と同じである(図3、4)。ここで、電極5と電極14の間隔 $d$ を2次元フォトリック結晶領域4の空孔周期 $a$ よりも小さくするとともに、その位置に2次元フォトリック結晶を形成する空孔3を含まないようにして、この領域が光を散乱あるいは反射しないようにされている。

【0066】本実施例6では、光ファイバー11-13が実施例5と同様に設けられているが、電極5と電極14とは分離されるとともに、これに加えられる電圧は独立して制御される。従って、光ファイバー11、12間は、電極1、5間に電圧 $V$ を印加することにより、修飾された2次元フォトリック結晶領域を介して導波されるが、光ファイバー11、13間は、これだけでは、電極14に対応する領域が修飾された2次元フォトリック結晶領域とならないので、導波されない。電極1と電極5、及び電極1と電極14の間にともに電圧 $V$ を印加し、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を、修飾された2次元フォトリック結晶領域に入射すると、入射光はこの領域を導波され、電極5のT字部で分岐され、光ファイバー12へ導かれるとともに、光ファイバー13へも導かれる。

【0067】このように、本実施例6は、電極5と電極14にかかる電圧を独立に制御することにより、光ファイバー11から導入された光の透過を光ファイバー12のみ、あるいは光ファイバー12と13の両方のいずれかに制御することができる電気光学スイッチおよび光導波路からなる光集積回路として機能させることができる。

(第7の実施例) 図4で説明したように、2次元フォトリック結晶領域4の電圧印加部のフォトリックバンドは、印加電圧に依存して変化する。このことを利用して、上述した第6の実施例(図13)を波長選択回路として機能するものとすることができる。図14は、電極1、14の間の印加電圧を変化させた場合の電極14の位置に対応する修飾された2次元フォトリック結晶領域のフォトリックバンドギャップを示す。印加電圧が $V$ の場合、この領域はエネルギーEの光は通しても、エネルギーがDの光を通さない。印加電圧が1.2Vの場合には、この領域はエネルギーがEの光およびDの両方の光を通す。同様に、電極5の位置に対応する修飾された2次元フォトリック結晶領域の場合にも、電極1、5間の

印加電圧が $V$ の場合、この領域はエネルギーEの光は通しても、エネルギーがDの光を通さない。印加電圧が1.2Vの場合、この領域はエネルギーがEの光およびDの光の両方を通す。

【0068】従って、電極1、5間に1.2Vの電圧、電極1、14間に $V$ の電圧を印加し、光ファイバー11によりエネルギーがEの光およびエネルギーがDの両方の光を修飾された2次元フォトリック結晶領域に入射すると、これらの光は電極5に対応する修飾された2次元フォトリック結晶領域を導波して電極5のT字部で分岐され、光ファイバー12導かれるとともに、電極14に対応する修飾された2次元フォトリック結晶領域にも導かれる。電極1、5間には1.2Vの電圧が印加されているから、光ファイバー12はエネルギーがEの光およびエネルギーがDの両方の光を受光できるが、電極1、14間には電圧 $V$ が印加されているので、光ファイバー13はエネルギーがEの光のみしか受光できない。このように本実施例7は、電極5、14に加える電圧を制御することで、波長選択回路として機能するものとできる。

(第8の実施例) 図15は、交差型光スイッチとして作用する本発明の実施例の上面側から見た斜視図である。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトリック結晶領域、51、52は第2の電極、18は第3の電極である。本実施例8では、第2の電極を底部が対向したV字型の電極51、52に分割し、第3の電極18をV字型の電極51、52の対向した底部の間にそれぞれ間隔 $d$ だけ離して配置したこと、およびV字型の電極51、52の端部に光を授受するための光ファイバーを配置したことにおいて実施例2-6と異なるのみで、他は同じである。電極51、52に印加される電圧と電極18に印加される電圧は独立に制御される。ここで、電極51、52と電極18の間隔 $d$ を2次元フォトリック結晶領域4の空孔周期 $a$ よりも小さくするとともに、その位置に2次元フォトリック結晶を形成する空孔3を含まないようにして、この領域が光を散乱あるいは反射しないようにされていることは実施例6と同じである。

【0069】本実施例8においても、V字型電極5で覆われた領域は、電極1、51間、電極1、52間に電圧を印加されると、修飾された2次元フォトリック結晶領域となる。2次元フォトリック結晶領域4のフォトリックバンド構造および電圧印加による修飾された2次元フォトリック結晶領域のフォトリックバンド構造は、第1の実施例の場合と同じである(図3、4参照)。実施例2-6と同様、本実施例でも、修飾された2次元フォトリック結晶領域は光導波路として作用する。即ち、電極1、51間に電圧 $V$ を印加して、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を入射させると、入射光は修飾された2次元フォトリック結晶領域を導波して光ファイ

バー12へと出力される。

【0070】ところで、本実施例8では、V字型の電極51、52の対向した底部の間には第3の電極18をそれぞれ間隔dだけ離して配置するとともに、電極51、52に印加される電圧と電極18に印加される電圧は独立に制御されるものとしたので、電極1、51間、電極1、52間にのみ電圧を印加して光ファイバー11により光エネルギーがAの光を入射させても、この光は光ファイバー12に導波されるのみである。なぜなら、電極18には電圧が印加されていないから、電極18に対応する2次元フォトニック結晶領域は、修飾された2次元フォトニック結晶領域とはならず、光導波路として機能しない。それゆえ、V字型の電極51に対応する2次元フォトニック結晶領域が、修飾された2次元フォトニック結晶領域となって光を導波しても、電極18に対応する2次元フォトニック結晶領域で、この光は阻止されてしまい、V字型の電極52に対応する修飾された2次元フォトニック結晶領域には伝播されないからである。

【0071】一方、電極1、51間、電極1、52間に電圧を印加するとともに、電極1、18間にも電圧Vを印加した場合には、電極51、電極52に対応する2次元フォトニック結晶領域が、修飾された2次元フォトニック結晶領域になるとともに、電極18に対応する領域も修飾された2次元フォトニック結晶領域になる。したがって、光ファイバー11により光エネルギーがAの光を入射されると、入射光は電極18に対応する領域を導波されて光ファイバー13、17に出力されることになる。

【0072】この機能は可逆的であり、光ファイバー13から光エネルギーがAの光が入射される場合においても同様である。すなわち、電極1、51間、電極1、52間にのみ電圧を印加した場合には、入射光は光ファイバー17にのみ伝播され、電極1、51間、電極1、52間に電圧を印加するとともに、電極1、18間にも電圧Vを印加した場合には、入射光は光ファイバー11、12にも伝播される。

【0073】このように、本実施例8は、電極1、18間への電圧印加を制御することにより光の出力状態を変化させることができ、バー状態、クロス状態を選択できる交差型光スイッチとして機能させることができる。

(第9の実施例) 図16は、4×4の光交換器として作用する本発明の実施例の平面図である。本実施例は、第8の実施例の交差型光スイッチを4つ組み合わせて4×4の光交換器を構成したものである。本実施例は図を簡便化するために平面図で示し、光ファイバーは図示を省略したが、構造の基本とする点は上述の実施例と同じである。1は第1の電極、2は電気光学基板、3は空孔、4は電気光学基板2中の2次元フォトニック結晶領域、51、52、53および54は第2の電極、181-184は第3の電極である。本実施例9では、第2の電極

を底部が対向したW字型の電極51-52および底部が対向したW字型の電極53-54とし、電極51および53の中央部は一体化した。第3の電極181-184をW字型の電極51-52の対向した底部の間およびW字型の電極53-54の対向した底部の間にそれぞれ間隔d(図示は省略)だけ離して配置したこと、およびW字型の電極51-54の端部に光を授受するための光ファイバーを配置した(ただし図示は省略9)ことにおいて実施例2-6および8と異なるのみで、他は同じである。電極51-54に印加される電圧と電極181-184に印加される電圧は独立に制御されるとともに、選択的に行われる。ここで、電極51、52と電極18の間隔dを2次元フォトニック結晶領域4の空孔周期aよりも小さくするとともに、その位置に2次元フォトニック結晶を形成する空孔3を含まないようにして、この領域が光を散乱あるいは反射しないようにされていることは実施例6と同じである。

【0074】本実施例では、第2の電極51、52、53および54の両端部の2次元フォトニック結晶領域4に対応する位置に、光ファイバーで入射光S1、S2、S3およびS4を加えるが、第3の電極181-184と電極1の間に選択的に電圧を加えることにより、出力光S1'、S2'、S3'およびS4'のいずれかに切り替えられる。

【0075】例えば、電極1と電極51、52、53および54の間に電圧Vを印加し、電極1と電極181-184の間のいずれにも電圧を印加しない状態で、エネルギーがAの入射光S1-S4を入射すると、電極51、52、53および54に対応する位置の2次元フォトニック結晶領域のみが修飾された2次元フォトニック結晶領域となるだけなので、入射光S1-S4は電極181-184に対応する位置で導波を阻止される結果、それぞれ出力光S1'、S2'、S3'およびS4'として出力される。

【0076】一方、電極1と電極51、52、53および54の間に電圧Vを印加するとともに、電極1と電極181-184の間にも電圧を印加した状態で、エネルギーがAの入射光S1-S4を入射すると、電極51、52、53および54に対応する位置の2次元フォトニック結晶領域のみが修飾された2次元フォトニック結晶領域となるので、入射光S1-S4は電極181-184に対応する位置で導波されることとなる。その結果、入射光S1は出力光S4'に、入射光S2は出力光S2'に、入射光S3は出力光S3'に、入射光S4は出力光S1'に、それぞれ出力される。

(その他の実施例) 上述の実施例では、電極1は2次元フォトニック結晶領域4を形成する電気光学基板2の全

面をカバーするものとしたが、修飾された2次元フォトニック結晶領域6を形成するためには、電極1もパターン電極5に対応する部分にのみ有れば良いわけであるから、たとえば、適当な半導体基板面にパターン電極5に対応するパターン電極をリソグラフィ技術により形成して、この上に電気光学基板2を形成しても良いわけである。

【0077】また、第1の実施例において、空孔3は周期的に形成されていればよく、図7に示すように電気光学基板2に対して垂直に形成されている必要はない。これは、空孔が周期的に形成されてさえいれば、領域4および6はフォトニック結晶と作用するからである。第2～9の実施例に関しても同様である。

【0078】

【発明の効果】本発明により、任意形状のフォトニック結晶構造の光導波路、電気光学スイッチ、それらからなる光集積回路、波長選択回路、交差型光スイッチ、及び光交換器を単一の2次元フォトニック結晶を用いて容易に作成できる。本発明によれば、フォトニック結晶の特徴を生かした超小型光集積回路を電気的に形成することができる。本発明は、光信号と電気信号が共存するオプトエレクトロニクス技術、例えばオプティカルインターコネクション技術に用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の最も単純な実施例1を上側からの斜視図の形で示す模式図。

【図2】図1のA-A位置で矢印方向に見た面断面図。

【図3】(a)は、2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造の模式図、(b)は修飾されたフォトニック結晶領域のフォトニックバンド構造の模式図。

【図4】2次元フォトニック結晶領域を挟む電極間に印加する電圧を変えた場合の修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンドギャップの位置の変化を示す図。

【図5】実施例1の光デバイスの作成手順の一つを示す

断面図。

【図6】図5に続く実施例1の光デバイスの作成手順を示す断面図。

【図7】図6に続く実施例1の光デバイスの作成手順を示す断面図。

【図8】(a)、(b)は実施例1の2次元フォトニック結晶領域を挟む電極間に電圧を印加する方法の例を示す図。

【図9】直線型光導波路として作用する本発明の光デバイスの実施例2の上側から見た斜視図。

【図10】L字型光導波路として作用する本発明の実施例3の上側から見た斜視図。

【図11】S字型光導波路として作用する本発明の実施例4の上側から見た斜視図。

【図12】T字型光導波路として作用する本発明の実施例5の上側から見た斜視図。

【図13】光導波路および電気光学スイッチからなる光集積回路として作用する本発明の実施例6の上側から見た斜視図。

【図14】図13の電気光学スイッチを実施例7の波長選択回路として機能させるための修飾された2次元フォトニック結晶領域のフォトニックバンドギャップを示す図。

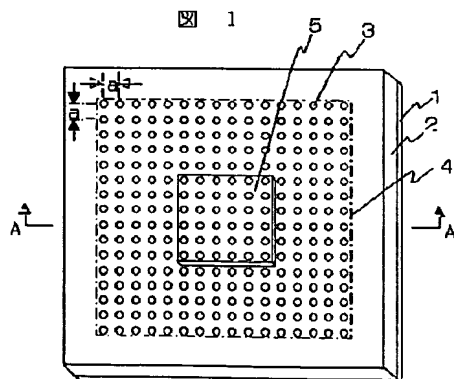
【図15】交差型光スイッチとして作用する本発明の実施例8の上側から見た斜視図。

【図16】4×4の光交換器として作用する本発明の実施例9の平面図。

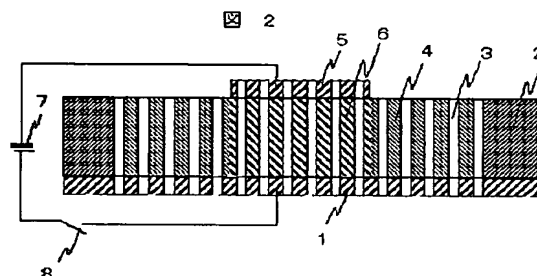
【符号の説明】

1：第1の電極、2：電気光学基板、3：空孔、4：2次元フォトニック結晶領域、5、51-54：第2の電極、6：修飾された2次元フォトニック結晶領域、7：電気回路、8：金属基板、9：電気回路7の電極、10：金属ワイヤー、11-13、17：光ファイバー、18、181-184：第3の電極。

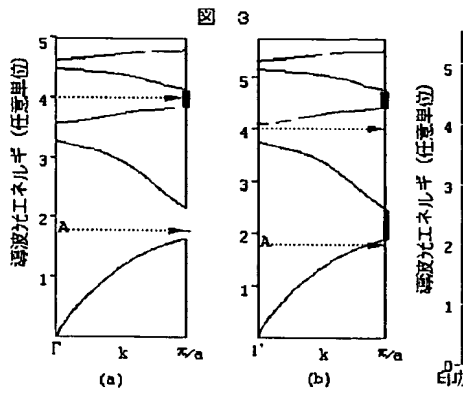
【図1】



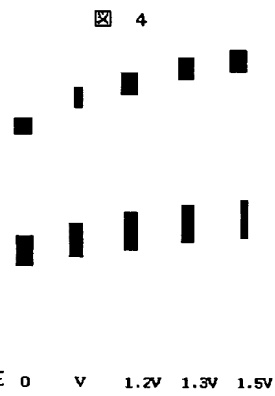
【図2】



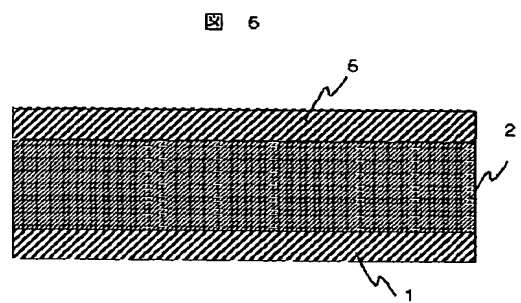
【図3】



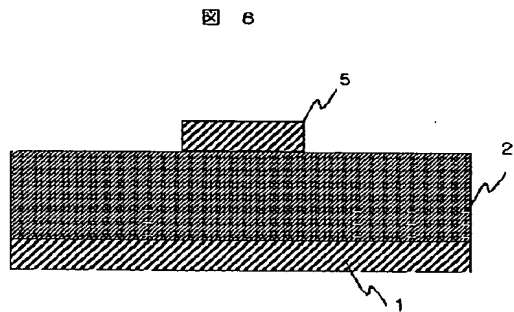
【図4】



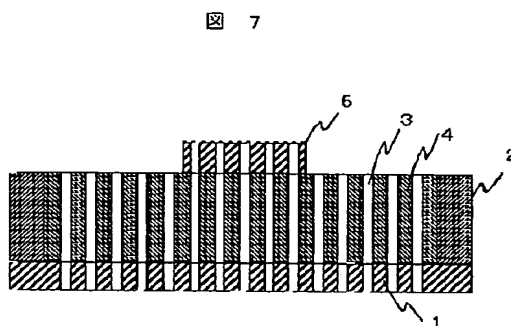
【図5】



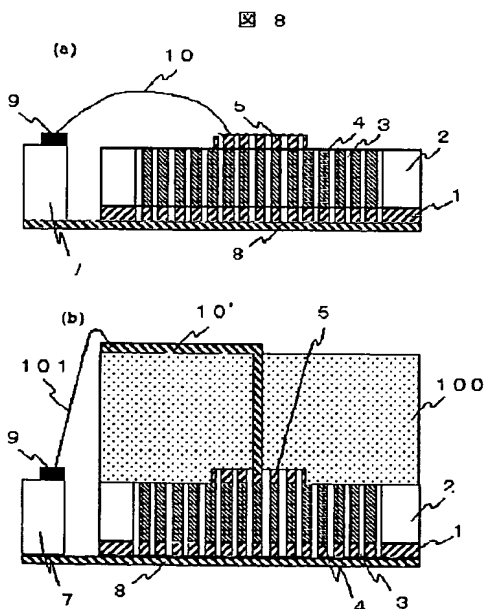
【図6】



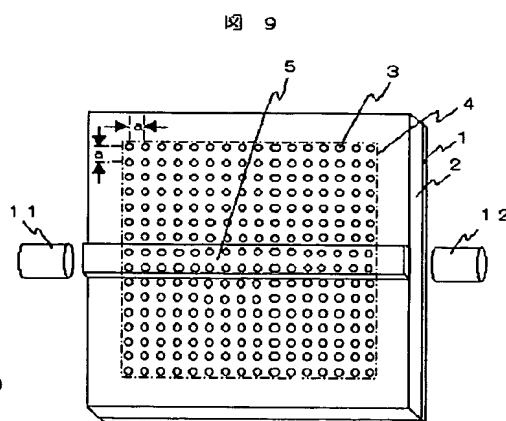
【図7】



【図8】

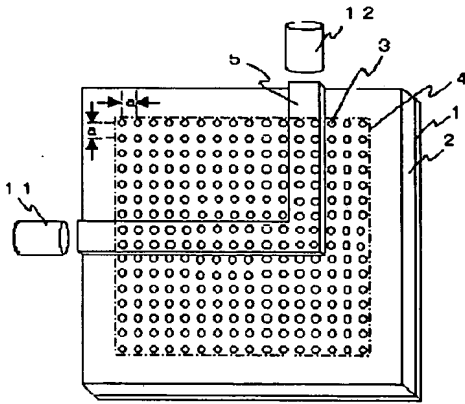


【図9】



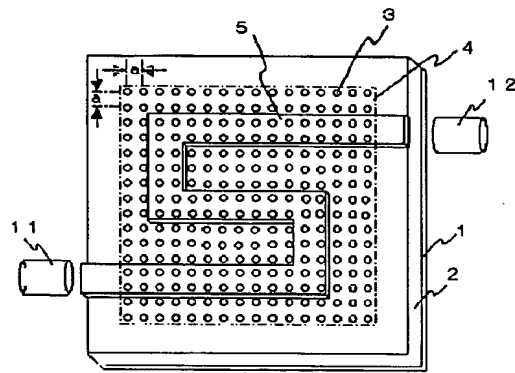
【図10】

図 10



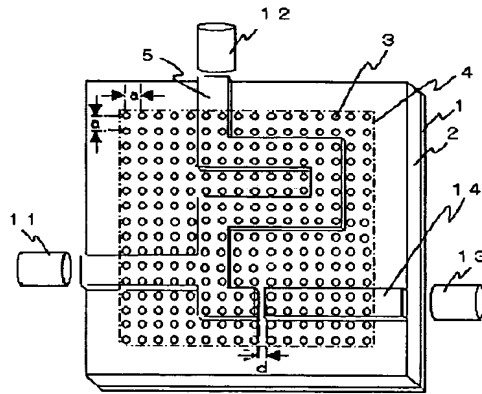
【図11】

図 11



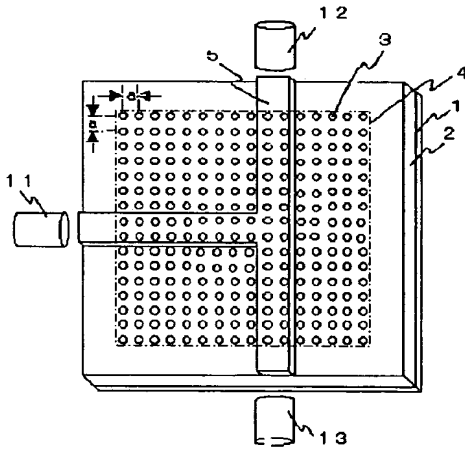
【図13】

図 13



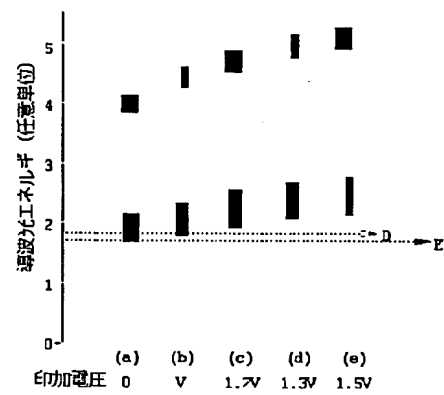
【図12】

図 12



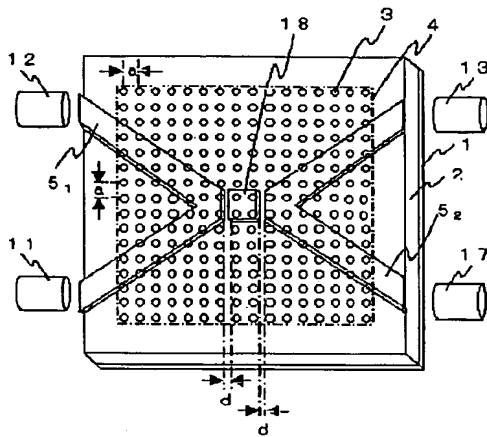
【図14】

図 14



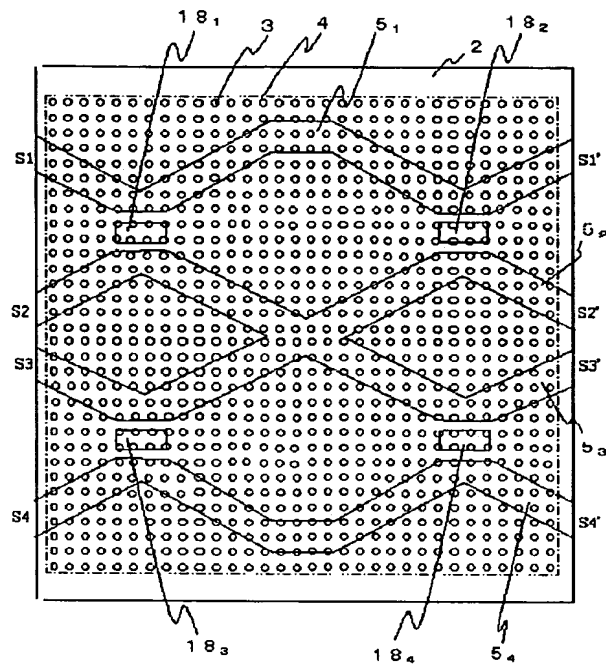
【図15】

図 15



【図16】

図 16



フロントページの続き

Fターム(参考) 2H047 KA03 NA02 PA21 RA08  
 2H079 AA02 AA12 BA01 BA03 CA01  
 CA05 CA07 DA03 EA03 EA04  
 EA05 EB12 EB15 KA08 KA20  
 2K002 AA01 AA02 AB04 AB34 BA06  
 CA03 DA06 DA07 DA08 DA20  
 EA07 EA14 EA15 EB02 EB03  
 EB05 EB09 HA03